DOI:10.11931/guihaia.gxzw202302021

添加生物质炭对桉树人工林土壤磷组分及转化的影响

叶小敏[1]，高冠女[1]，张文[1]，尤业明[1,2]，黄雪蔓[1,2*]
（1. 广西大学 林学院，广西森林生态与保育重点实验室，南宁 530004；
2. 广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站，崇左凭祥友谊关森林生态系统
广西野外科学观测研究站，广西 凭祥 532600）

摘要：为改善我国亚热带桉树人工林土壤普遍存在磷（phosphorus，P）供应不足的状况，该研究利用生物质炭（biochar，BC）作为土壤改良剂，以桉树人工林（林龄为 15 年）土壤为研究对象，通过室内培养实验，分别加入不同比例[0（CK）、2%、5%、10%和 20%]的 BC，重点探究不同用量 BC 对土壤 P 组分及转化的影响及其与土壤理化性质之间的关系。结果表明：（1）与 CK 相比，20%的 BC 添加量下显著提高土壤氨态氮（NO_3^--N）、全磷（TP）、微生物生物量磷（MBP）含量和 pH 值（P<0.05），而 2%、5%和 10%的 BC 添加量下只显著提高 MBP 和 pH 值（P<0.05），对其他土壤理化指标无显著影响。（2）与 CK 相比，在 2%的 BC 添加量下显著提高易利用性 P（LP）（P<0.05），在 5%和 10%的 BC 添加量下显著提高极易利用性 P（AP）和 LP（P<0.05），在 20%的 BC 添加量下显著提高 AP、LP 和难利用性 P（OP）（P<0.05），但中等程度利用性 P（MP）在 4 种 BC 添加量下均无显著变化。（3）与 C、N 和 P 转化相关的β-葡萄糖苷酶（BG）、N-乙酰-葡萄糖苷酶（NAG）、蛋白酶（LAP）和酸性磷酸酶（ACP）活性均在 10%和 20%的 BC 添加量下显著高于 CK（P<0.05）。（4）相关分析结果表明，ln（BG）和 ln（NAG+LAP）均与 ln（ACP）呈显著正相关关系（P<0.05）；冗余分析（redundancy analysis，RDA）表明 pH、TN 和 TP 是驱动桉树人工林土壤 P 组分变化的最主要因素，而结构方程模型（structural equation model，SEM）进一步表明 pH、C:P 和 N:P 是驱动土壤 P 转化的最关键因子。综上所述，不同用量 BC 主要通过影响土壤理化性质进而提高与 C、N 循环相关的酶活性，并在一定程度上改善桉树人工林土壤的 P 供应潜力，其中以高浓度 BC 添加量（20%）的效果最佳。该研究对指导我国桉树人工林土壤养分管理及促进林业可持续发展具有重要的意义。

关键词: 生物质炭，桉树人工林，土壤磷组分，土壤酶活性，亚热带

Effects of biochar addition on soil phosphorus composition and transformation in *Eucalyptus* plantation

YE Xiaomin[1], GAO Guannv[1], ZHANG Wen[1], YOU Yeming[1,2], HUANG Xueman[1,2*]
（1. *Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, College of Forestry, Guangxi University*, Nanning 530004, China; 2. *Guangxi Youyiguan Forest Ecosystem National Research Station, Youyiguan Forest Ecosystem Observation and Research Station of Guangxi*, Pingxiang 532600, Guangxi, China）

Abstract: In order to improve the Phosphorus (P) deficiency in the soil of *Eucalyptus* plantations

基金项目：国家自然科学基金（31960240, 32171755）；广西自然科学基金（2019GXNSFAA185023）；崇左凭祥友谊关森林生态系统广西野外科学观测研究站科研能力建设项目（桂科 2203513003）。
第一作者：叶小敏（2001-），研究方向为人工林土壤养分循环，(E-mail) 780586627@qq.com。
***通信作者：**黄雪蔓，博士，副教授，研究方向为人工林土壤养分循环及其调控，(E-mail) huangxm168168@163.com。

in subtropical China. We used biochar (BC) as a soil amendment, investigating the soil of *Eucalyptus* plantations (15 years old). Meanwhile, we added the different proportions [0(CK), 2%, 5%, 10% and 20%] of BC through the laboratory culture experiment to evaluate the effects of different amounts of BC on P components and transformation in soil and its relationship with soil physicochemical properties. The results were as follows: (1) Compared to CK, the nitrate nitrogen (NO_3^--N), total phosphorus (TP), microbial biomass phosphorus (MBP) and pH values were significantly increased at 20% BC addition, respectively (P<0.05), the MBP and pH values were significantly increased at 2%, 5%, and 10% BC addition, respectively (P<0.05), while no marked difference was found in other soil physicochemical properties. (2) compared to CK, the labile P (LP) was significantly increased at 2% of BC addition (P<0.05), the available P (AP) and LP were significantly increased at 5% and 10% of BC addition, respectively (P<0.05). Moreover, the AP, LP and oclude P (OP) were significantly increased at 20% BC addition (P<0.05), whereas the moderately available P (MP) had no significant change under the four BC supplemental levels.

(3) The total activity of hydrolytic enzymes involved in C metabolism (β-glucosidase, BG), N metabolism (β-N-acetylglucosaminidase, NAG and L-leucine aminopeptidase, LAP), and P metabolism (acid phosphatase, ACP) increased significantly at 10% and 20% of BC addition than those in CK (P<0.05). (4) Correlation analysis showed that ln (BG) and ln (NAG+LAP) were positively correlated with ln (ACP), respectively (P<0.05). In addition, redundancy analysis (RDA) indicated that pH, TN and TP appeared to be the primary drivers of variations in soil P components of *Eucalyptus* plantations. Furthermore, structural equation model (SEM) revealed that the pH, C:P and N:P of soil were the most critical factors driving P transformation. In conclusion, our findings suggest that different amounts of BC improve the enzyme activities related to C, N cyclings by affecting soil physicochemical properties and improving the P supply potential of soil in *Eucalyptus* plantations. Notably, 20% BC addition had the optimum effect. This study provides critical theoretical guidance for gaining knowledge on soil nutrient management in *Eucalyptus* plantations and facilitating the sustainable development of forests in subtropical China.

Key words: biochar, *Eucalyptus* plantation, soil phosphorus component, soil enzyme activity, subtropics

磷（phosphorus，P）是植物生活史中必不可少的矿质营养元素之一（曹娟等，2014），参与植物体内糖、蛋白质和叶绿素等物质的合成，还以多种方式参与了植物从个体发生到自然死亡所经历的全部生理生化过程，而土壤中的 P 是植物获取 P 的来源，其形态结构直接影响土壤 P 的生物有效性（李新乐等，2015）。P 在土壤中的形态分为无机磷（inorganic phosphorus，Pi）和有机磷（organic phosphorus，Po）两种（高艺伦等，2022）。Pi 多以正磷酸盐的形态存在，在我国以侵蚀性红壤酸性土为主的南方地区，其大多与 Fe、Al 结合形成难以被植物吸收的磷酸盐。Po 在全球范围的土壤 P 库中储量丰富，大约占总 P 的 15%~80%，但却需经过生物矿化转变为溶解磷酸盐才能被植物吸收利用（Achat et al., 2009）。由于亚热带地区具有多雨的气候条件，会使土壤中的有效性 P 出现“淋溶”现象并随着下渗水大量流失，导致土壤 P 供应不足（Zhang et al., 2021），因此，P 长期以来被认为是限制该区域人工林生态系统生产力及可持续经营的最关键因子之一（Crous et al., 2015），深入研究亚热带人工林土壤 P 组分变化趋势和转化机制有助于提高土壤 P 的有效性，也有益于维持生态系统的生产力和生态过程的可持续发展。

生物质炭（biochar，BC）是生物质在无氧或缺氧条件下热解转化的产物（刘亦陶等，2019）。研究表明，BC 作为一种新材料，在人为输入土壤生态系统后，可以有效改良土壤和提升地力（郜礼阳等，2021）。BC 的多孔性有利于土壤孔隙度的增加和土壤容重的

降低（赵泽州等，2021），其巨大的比表面积可释放大量电荷，有效吸附 N、P 等元素，促进土壤养分的固持（武玉等，2014）。有研究表明，BC 即使在施用量较低的情况下，其仍具有较强的维持土壤生产力与肥力的能力（Schulz et al., 2013）。此外，BC 对 Ca^{2+}、Fe^{3+}、Al^{3+}等阳离子的吸附作用，能降低阳离子与 P 素的结合，提高土壤中的有效 P 的含量（Liu et al., 2017）。Xu 等（2014）通过评估四种生物炭施用量（0、1%、5%和 10%，w/w）对土壤 P 的影响，发现施用 BC 可以改变土壤 P 的吸附和解吸能力，从而改变土壤 P 的有效性。BC 添加不仅能直接增加土壤中的有效 P 含量，还能改变土壤理化性质和微生物群落，进而影响土壤 P 的吸附和矿化（Kloss et al., 2014）。Pandit 等（2018）的研究发现，随着 BC 的添加，土壤 pH 值增加，土壤矿物表面负电荷增加，对 P 的吸附减少，土壤 P 素有效性增加。此外，BC 能影响微生物活性，促进 P 在土壤中的矿化（Li et al., 2019），其原因可能包括：1) BC 表面活性官能团能够增强其与土壤之间的相互作用，为参与土壤养分循环过程的微生物营造适宜的栖息空间（赵泽州等，2021）；2) BC 能增加土壤有机碳含量，进而提高土壤微生物活性（Demisie et al., 2014）。而土壤酶活性是评价土壤质量和土壤微生物活性的重要指标之一（Liu et al., 2017）。因此，探究不同用量 BC 输入对土壤养分和土壤酶活性的影响，进而分析 P 组分的变化和转化过程，这对于改进 BC 施用方法、增加土壤有效 P 含量、减少 P 损失、提高土壤质量并维持人工林生态系统稳定性等方面具有重要意义。

桉树（*Eucalyptus*）由于具有生长快、用途多、经济价值高和适应性广等特点，在南方地区被大量种植，为我国林业生产和经济建设作出了重要贡献（王敏等，2021）。然而，桉树人工林的广泛种植和多代连栽极易导致土壤板结、通气性差和肥力急剧下降等问题，严重影响了土壤质量和人工林的可持续经营（温远光等，2019）。Costa 等（2016）研究发现，有效 P 池受 Pi 溶解和 Po 矿化的影响，在缺 P 的桉树林地或低 P 肥供应的栽培条件下存在有效 P 缺乏现象。尽管桉树人工林可以通过添加 P 肥显著提高其增长率（Valadares et al., 2020），但过度施加 P 肥会造成土壤 P 盈余，并随降雨或地表径流进入河流湖泊，这样在浪费资源的同时也会造成环境污染（吉庆凯等，2021）。目前已有施用 BC 改变土壤 P 有效性的报道（Xu et al., 2014），但有关 BC 对亚热带桉树人工林土壤 P 形态转换的影响及其调控机理仍知之甚少（Foltran et al., 2019），且对 BC 添加量与土壤 P 转化之间特定的相互作用研究相对缺乏，这极大限制了 BC 在该地区的应用与推广。因此，本研究以亚热带长期经营的桉树人工林土壤（红壤）作为研究对象，采用室内培养试验，拟重点探究不同用量 BC 对桉树人工林土壤 P 组分变化的影响，并初步阐明 BC 调控土壤 P 转化的主要路径及其关键驱动因子，为提升桉树人工林土壤 P 有效性的 BC 施用量的选择提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验设计

研究区位于中国广西壮族自治区凭祥市内中国林科院热带林业实验中心（106°51′—106°53′ E，22°02′—22°04′ N）哨平林场，属于亚热带区，为典型的亚热带季风气候，光照充足，年平均气温为 20.5~21.7 ℃。降雨集中在每年的 4—9 月份，年平均降雨量约为 1 401 mm，雨季高温多雨，雨热同期。该地区的主要地貌类型为低山丘陵，土壤类型主要是由花岗岩经高温与干湿交替条件下风化后形成的酸性红壤。

基于碳化温度>600 ℃时 BC 中的 P 具有更稳定的热化学性质（Johan et al., 2021），本实验选择碳化温度为 600 ℃条件下用水稻秸秆所制得的生物质炭作为试验的添加材料，随机采集桉树人工林（林龄 15 年）的表层（0~10 cm）土壤作为供试土样，BC 和供试土壤的基本理化性质详见表 1。将采集的土壤（约 30 kg）风干后过 2 mm 筛，装袋备用。采用室内培养试验，共设置 5 种 BC 添加量处理，分别是 0（CK）、2%（2B）、5%（5B）、

10%（10B）和 20%（20B），每组处理 5 个重复。BC 与土壤充分混匀后装入培养瓶（容量为 125 ml，具有透气盖）中，并经压实接近野外林地的土壤容重，放置于恒温（25 ℃）培养箱内进行暗培养，培养过程中适时加水，使土壤样品保持最大持水量的 40%，培养一年后测定土壤理化性质、P 组分和酶活性等指标。

表 1 试验样品基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of experimental samples

样品 Sample	土壤容重 BD（$g\cdot cm^{-3}$）	全氮 TN（$g\cdot kg^{-1}$）	总磷 TP（$g\cdot kg^{-1}$）	氨态氮 NH_4^+-N（$mg\cdot kg^{-1}$）	硝态氮 NO_3^--N（$mg\cdot kg^{-1}$）	酸碱度 pH
土壤 Soil	1.26±0.08	0.98±0.04	0.30±0.03	24.20±1.01	4.14±0.36	4.62±0.05
生物质炭 Biochar	-	0.31±0.07	69.18±1.65	8.01±0.28	0.79±0.12	11.09±0.09

BD. 土壤容重；**TN**. 全氮；**TP.** 总磷；**NH_4^+-N**. 氨态氮；**NO_3^--N.** 硝态氮；**pH**. 酸碱度；数据＝平均值±标准误，下同。

BD. Bulk density; **TN**. Total nitrogen; **TP.** Total phosphorus; **NH_4^+-N**. Ammonium nitrogen; **NO_3^--N.** Nitrate nitrogen.**pH**. pH value. Data = Mean ± standard error. The same below.

1.2 试验方法

土壤容重、最大持水量等用环刀法测定（刘光崧，1996）；用于测定土壤 pH 的土壤和水的质量比为 1:2.5；土壤样品的总有机碳（SOC）采用重铬酸钾-硫酸外加热法测定（Nelson et al., 1982）；土壤总氮（TN）采用凯氏定氮法进行测定；铵态氮（NH_4^+-N）和硝态氮（NO_3^--N）的测定是将 50 mL 的 $CaCl_2$（0.01 $mol\cdot L^{-1}$）浸提液加入相当于 10 g 干重的鲜土后得到待测液，测定仪器是连续流动分析仪（黄雪蔓等，2014）。土壤全磷（TP）采用 $HClO_4$-H_2SO_4 消解（Vance et al., 1987），使用钼锑抗比色法进行测定（Murphy & Riley, 1962）。

采用氯仿-熏蒸浸提法测定土壤微生物生物量磷（MBP）（Vance et al., 1987），称取土壤样品（5 g）3 份，第一、二份做熏蒸和未熏蒸进行对比处理，第三份未熏蒸土壤加入 250 μL KH_2PO_4（250 $mol\cdot mL^{-1}$），三份土壤经处理后加入 40 mL $NaHCO_3$（0.5 $mol\cdot mL^{-1}$）浸提液，采用钼锑抗比色法进行测定（Murphy & Riley, 1962）。

采用荧光微平板法测定参与土壤 C、N 和 P 循环相关的土壤酶活性（Saiya-Cork et al., 2002）。称取相当于 1.25 g 干重的鲜土，加入 125 mL 超纯水，在 4 ℃条件下，在微型搅拌机下搅拌 55 s，制成均质土壤悬液，每个样品设置 8 个重复，加入酶底物后在 25 ℃培养箱中恒温暗培养 4 h，之后使用酶标仪（波长 365~450 nm）测定。所有总的酶活性单位统一为 $nmol\cdot h^{-1}\cdot g^{-1}$ soil，测定的酶种类、功能及底物信息详见表 2。

表 2 土壤 C、N、P 水解酶底物基本信息

Table 2 Basic information of soil C、N and P hydrolytic enzyme substrate

酶的种类 Enzyme type	名称 Enzyme	功能 Function	底物及浓度 Substrate and concentration
C 水解酶 C-hydrolytic enzyme	β-葡萄糖苷酶（β-glucosidase，BG）	将纤维素分解为葡萄糖 (Hydrolysis of cellulose to glucose)	4-MUB-β-D-glucoside（200$\mu mol\cdot L^{-1}$）
N 水解酶 N-hydrolytic enzyme	N-乙酰-葡萄糖苷酶（β-N-acetylglucosaminidase，NAG）	降解几丁质 (Chitin degradation)	4-MUB-N-acetyl-β-D-glucosaminide（200$\mu mol\cdot L^{-1}$）
	蛋白酶（L-leucine aminopeptidase，LAP）	水解蛋白质 (Hydrolyze proteins)	L-Leucine-7-amino-4-methylcoumarin（200$\mu mol\cdot L^{-1}$）
P 水解酶	酸性磷酸酶（ACP）	催化磷酸酯或磷酸酐的水	4-MUB-phosphate（100$\mu mol\cdot L^{-1}$）

P-hydrolytic enzyme	（acid phosphatase，ACP）	解反应 (Catalyze the hydrolysis of phosphate esters or phosphate complexes)

采用 Hedley 法对土壤 P 进行分级（张林等，2009）。其主要特点是同时兼顾了 Pi 和 Po 两种 P 组分的分级提取，将土壤中 P 组分分为 7 种：树脂交换态 P（Resin-P）、$NaHCO_3$-P、微生物细胞 P（Microbial-P）、NaOH 溶性 P（NaOH-P）、土壤团聚体内 P（超声波分散/NaOHs-P）、磷灰石型 P（HCl-P）和残留 P（Residual-P），7 种 P 组分均采用钼锑抗比色法测定（Demisie et al., 2014）。同时，将以上 7 种 P 组分归纳为能被植物直接吸收的极易利用性 P（available P，AP）、易利用性 P（labile P，LP）、中等程度利用性 P（moderately available P，MP）和难利用性 P（包裹 P）（oclude P，OP）四类（Yang & Post, 2011）。其中将 Resin-P 归为 AP；$NaHCO_3$-P 和 Microbial-P 归为 LP；NaOH-P 归为中等程度 MP；而把 NaOHs-P、HCl-P 和 Residual-P 归为 OP。

1.3 数据处理

在统计分析软件 SPSS 25.0（SPSS Inc., Chicago, IL, USA）上，采用单因素方差分析（one-way ANOVA）添加不同用量 BC 的土壤理化性质、MBP、土壤 P 组分和土壤酶活性的差异，采用最小显著差异法（LSD）比较均值之间的差异程度，显著水平全部设置为 P＜0.05；使用 Pearson 相关性分析方法对酶化学计量之间的相关性进行研究；使用主成分分析（principal components analysis，PCA）方法区分不同用量 BC 添加后土壤 P 组分的变化，并通过冗余分析（redundancy analysis，RDA）确定影响土壤 P 组分变化的主要因素，PCA 和 RDA 分析均在统计软件 Canoco 5.0（Biometris-Plant Research international, Wageningen, The Netherlands）上完成；采用结构方程模型（structural equation model，SEM）构建添加不同用量 BC 影响 ACP 转化的调控路径，分析过程在 Amos 24.0 程序（SPSS Inc., Chicago, IL）上完成。在软件 Sigma Plot 12.0 和 Microsoft Office Visio 2007 完成所有的作图。

2 结果与分析

2.1 不同用量生物质炭对土壤理化性质的影响

不同用量 BC 的添加使得桉树人工林的土壤 pH、SOC、TN、NH_4^+-N、NO_3^--N、TP 和 MBP 均发生不同程度的变化。从表 3 可以看出，与 CK 相比，在 4 种添加量（2%、5%、10%和 20%）下土壤的 pH 分别显著提高了 10.1%、20.8%、24.8%和 40.1%（P<0.05）；在 20% 添加量下 NO_3^--N 和 TP 分别显著增加了 51.6%和 110.7%（P<0.05）；而 MBP 在 4 种添加量下也分别显著增加了 149.7%、258.7%、205.4%和 350.5%（P<0.05）。与 CK 相比，4 种 BC 添加量下的 SOC 和 TN 在均无发生显著变化。

表 3 不同用量生物质炭对桉树人工林土壤理化性质的影响

Table 3 Effects of different amounts of biochar on soil physical and chemical properties of *Eucalyptus* plantation

处理 Treatment	有机碳 SOC （g·kg^{-1}）	全氮 TN （g·kg^{-1}）	铵态氮 NH_4^+-N （mg·kg^{-1}）	硝态氮 NO_3^--N （mg·kg^{-1}）	总磷 TP （g·kg^{-1}）	微生物生物量磷 MBP （mg·kg^{-1}）	酸碱度 pH
CK	19.77±2.10a	0.95±0.05ab	25.40±0.96a	4.32±0.33b	0.28±0.04b	17.49±0.49e	4.56±0.03d
2B	20.64±2.09a	1.08±0.01a	26.13±0.60a	4.78±0.31ab	0.36±0.04b	43.67±0.58d	5.02±0.05c
5B	21.22±2.44a	0.99±0.04ab	26.21±0.74a	4.59±0.39ab	0.43±0.05b	62.74±0.97b	5.51±0.20b
10B	22.33±2.25a	0.93±0.06b	25.93±1.66a	5.86±0.84ab	0.43±0.04b	53.41±0.28c	5.69±0.04b

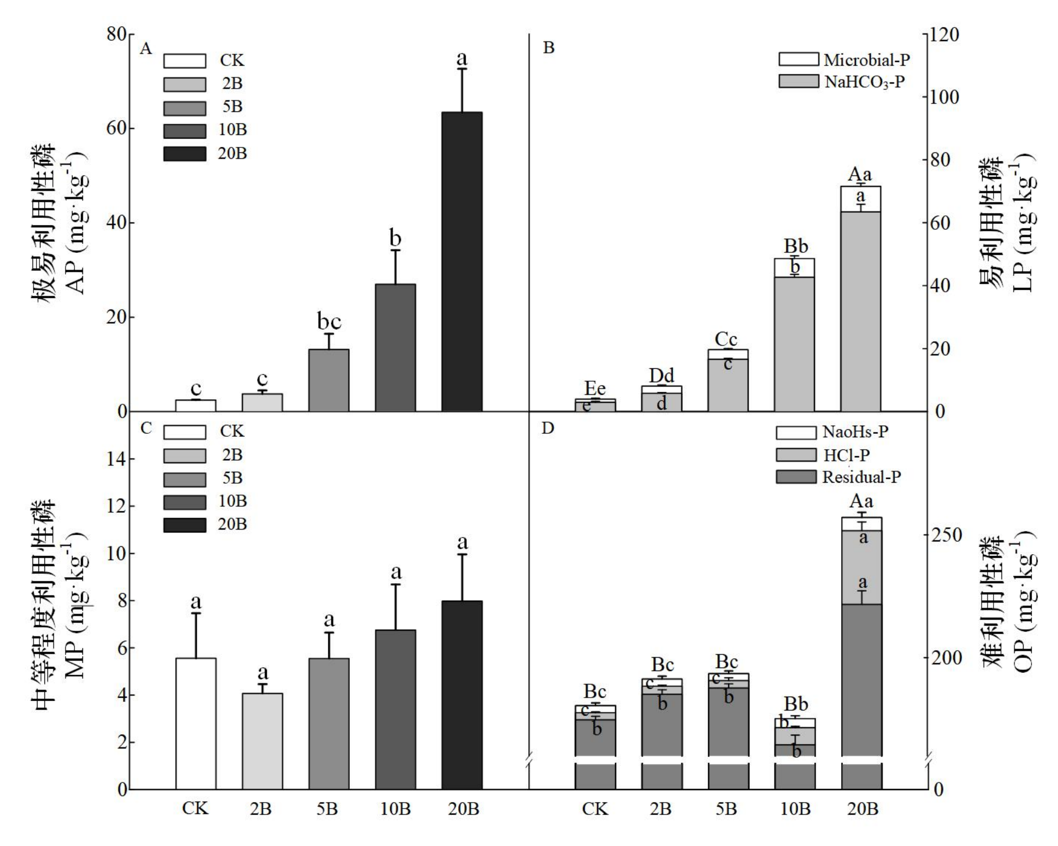
20B	24.86±2.60a	0.82±0.03b	24.85±0.99a	6.55±1.16a	0.59±0.04a	78.79±1.58a	6.39±0.05a

注：**SOC**. 有机碳；**MBP.** 微生物生物量磷。同列不同小写字母表示该指标在不同处理间差异显著（*P*<0.05）。数据＝平均值±标准误。

Note： **SOC**. Soil organic carbon. **MBP.** Soil microbial biomass phosphorus. Different lowercase letters in the same column meant significant difference at 0.05 level. Data = Mean ± standard error.

2.2 不同用量生物质炭对土壤 P 组分的影响

与 CK 相比，添加不同用量 BC 后 AP 有所提高，且在 10%与 20%添加量下达到显著水平，分别提高了 10.0%和 24.9%（图 1：A）；在 2%、5%、10%与 20%的添加量下 LP 分别显著提高了 1.6%、5.4%、14.9%和 22.4%（图 1：B）（*P*<0.05）；4 种添加量对 MP 均无显著影响（图 1：C）；此外，在 20%添加量下 OP 显著提高 42.5%（图 1：D）（*P*<0.05）。



不同大写字母表示不同用量 BC 间各 P 组分叠加之和的差异性显著。不同小写字母表示不同用量 BC 间各 P 组分差异性显著（*P*<0.05）。数据=平均值±标准误，下同。

Different capital letters indicate that the sum of P components between different amounts of BC is significantly different. Different lowercase letters indicate significant difference of P components between different amounts of BC at 0.05 level. Data = Mean ± standard error, the same below.

图 1 不同用量 BC 对土壤 P 组分的影响

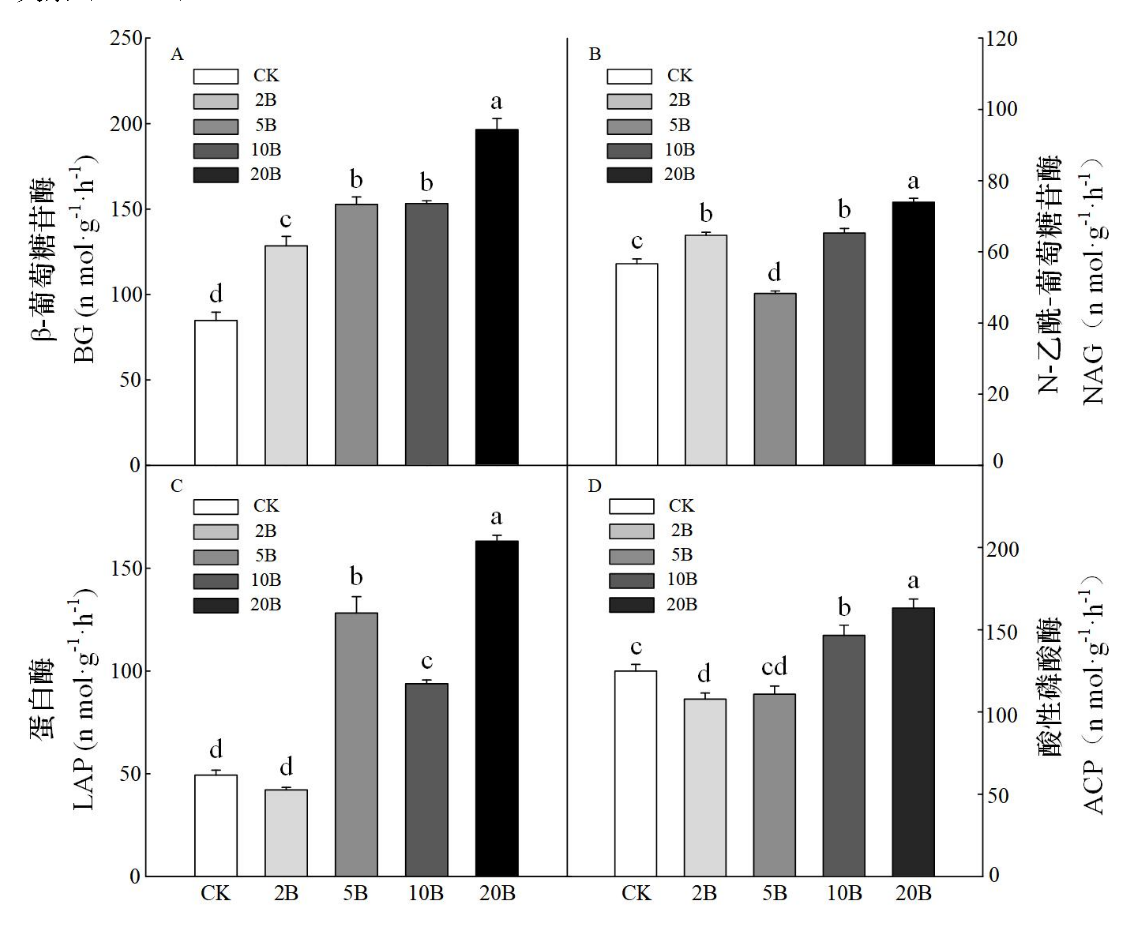
Fig. 1 Effects of different amounts of biochar on P component in soil

2.3 不同用量生物质炭对土壤酶活性及酶化学计量比的影响

与 CK 相比，BG 在 4 种添加量下分别显著提高 63.8%、68.0%、80.8%和 131.8%（图 2：A）（*P*<0.05）；NAG 在 2%、10%和 20%的添加量下分别显著提高 14.1%、15.3%和 30.6%（图 2b）（*P*<0.05）；LAP 在 5%、10%和 20%的添加量下分别显著提高 160.0%、90.3%和 231.0%（图 2：C）（*P*<0.05）；ACP 在 10%和 20%的添加量下显著提高 17.2%和 44.4%（图 2：D）（*P*<0.05）。

由图 3 可以看出，ln（BG）和 ln（NAG+LAP）均与 ln（ACP）呈现显著线性正相关

关系（*P*<0.05）。



不同小写字母表示不同用量 BC 间差异性显著（*P*<0.05）。

Different lowercase letters indicate significant difference of soil enzyme activities between different amounts of BC at 0.05 level.

图 2 不同用量 BC 对土壤酶活性的影响

Fig. 2 Effects of different amounts of biochar on soil enzyme activities

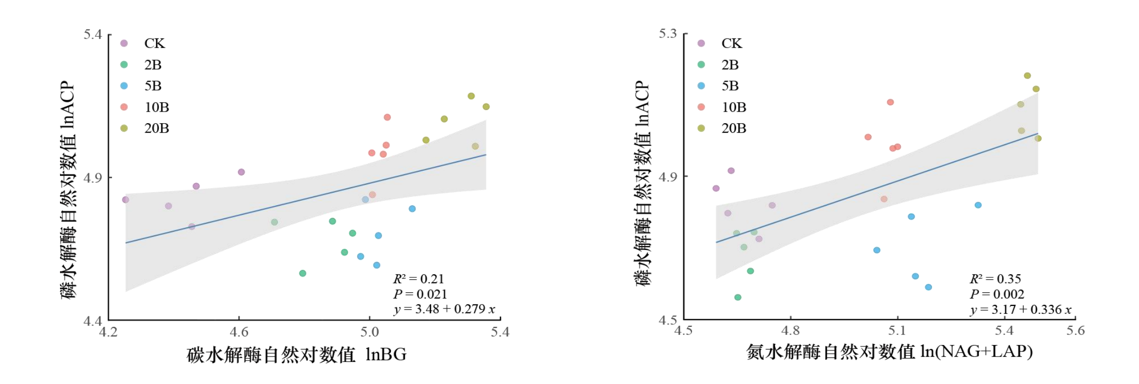


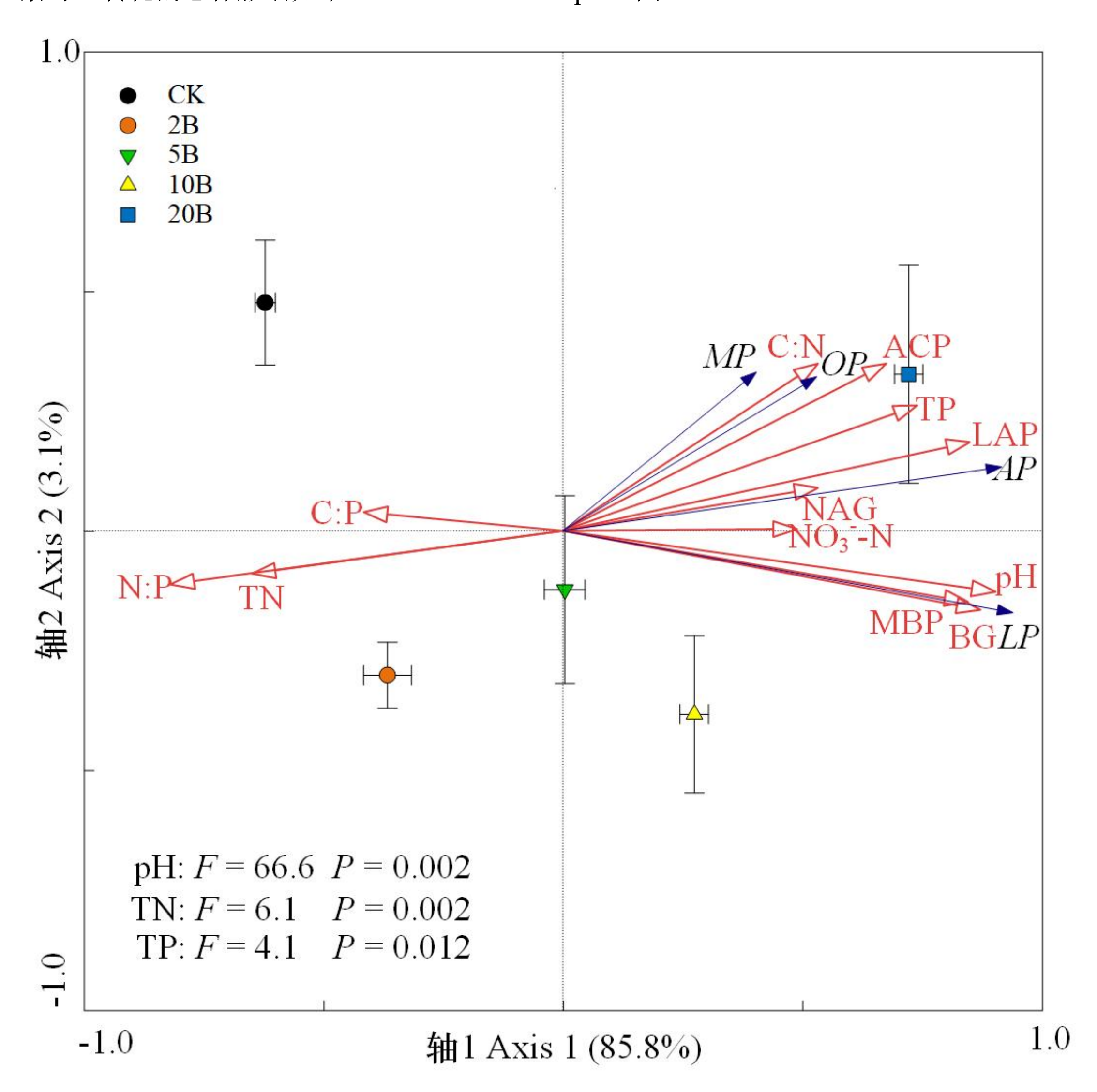
图 3 酶化学计量特征相关性

Fig. 3 Correlation between ecoenzymatic stoichiometry

2.4 不同用量生物质炭对土壤 P 组分及转化的影响

由图 4 可以看出，与 CK 相比，5%、10%和 20%添加量下，P 组分发生不同程度的变化，被第一主轴明显区分开，但 2%添加量的 P 组分变化较小，仅被第二主轴区分开。通过 RDA 程序对 12 个主要环境因子进行排序后确定 pH（F=66.6，P=0.002）、TN（F=6.1，P=0.002）和 TP（F=4.1，P=0.012）是影响 P 组分的最关键因子，分别解释了 P 组分变化的 74.3%、5.6%和 3.3%（图 4）。

结构方程模型（SEM）表明，不同添加量生物质炭（Biochar Amounts，BA）对土壤 pH、土壤养分化学计量比（C:P 和 N:P）产生显著影响，并最终驱动了 P 的转化（ACP）；模型解释了 P 转化的 72.4%的变异（χ^2=7.530, P=0.582, CMIN/df=0.830, NFI=0.964, CFI=1.000, RMSEA<0.050）（图 5：A）。BA、pH 以及土壤 C:P 化学计量比对 ACP 活性有直接的正效应，而土壤 N:P 化学计量比对 ACP 活性则有直接的负效应，各因素对 P 转化的总体影响如下：BA＞N:P＞C:P＞pH（图 5：B）。



NAG. N-乙酰-葡萄糖苷酶；**BG**. β-葡萄糖苷酶；**ACP**. 酸性磷酸酶；**LAP**. 亮氨酸氨基肽酶；**C:P**. 有机碳与总磷的比值；**N:P**. 总氮与总磷的比值；**C:N**. 有机碳与总氮的比值。

NAG. β-N-acetylglucosaminidase; **BG**. β-Glucosidase; **ACP**. Phosphatase; **LAP**. L-leucine aminopeptidase; **C:P**. Ratio of organic carbon to total phosphorus; **N:P**. Ratio of total nitrogen to total phosphorus; **C:N**. Ratio of organic carbon to total nitrogen.

图 4 土壤 P 组分和土壤基本理化性质及酶活性的冗余分析

Fig. 4 Redundancy analysis of soil phosphorus components, soil physicochemical properties and enzyme activities

BA. 生物质炭添加量。箭头上的数字是标准化直接影响，虚线箭头代表负面影响。R^2值代表为特定因变量解释的总方差的比例。模型的拟合优度统计如下所示。*表示 $P < 0.05$; **表示 $P < 0.01$; ***表示 $P < 0.001$。

BA. Biochar amounts.The numbers on the arrows are the direct effects of standardization, and the dotted arrows represent the negative effects. The R^2 squared value represents the proportion of the total variance explained for a particular dependent variable. The goodness of fit statistics of the model are shown as below. * represents $P < 0.05$; ** represents $P < 0.01$; *** represents $P < 0.001$.

图 5 (A) 控制 P 转化（ACP 活性）的结构方程模型（SEM），(B) SEM 得出的对 P 转化的标准化总效应（直接效应+间接效应）

Fig. 5 (A) Structural equation model (SEM) for control of P transformation (ACP activity), (B) Standardized total effects (direct plus indirect effects) on P transformation derived from the SEM.

3 讨论

3.1 不同用量生物质炭对土壤理化性质及 P 组分的影响

大部分 BC 通过植物生物质热解制备得到，因此植物生长发育所需的诸多营养元素基本有所保存，其次受到浓缩效应的影响，BC 的营养元素含量较高，因此可作为良好的土壤改良剂。许多研究发现，BC 的输入不仅能改变土壤的物理性质（如：孔隙度、通气性和含水量等）（Oguntunde et al., 2008；田丹等，2013），也能对土壤的化学性质（如：SOC、TN、TP 和 pH 值等）产生不同程度的影响（Schneider & Haderlein, 2016）。本研究中，随着不同用量 BC 的添加，桉树人工林土壤中 TP 含量仅在 20%的添加量下效果达到显著，可能是 BC 输入促进土壤 TP 中 P 组分向易被植物吸收的 AP、LP 转化，提高土壤中 P 的有效性。MBP 是土壤中重要的活性磷源，能在一定程度上反映土壤供磷能力（宋凯悦等，2021），本研究中 BC 添加均能显著提高 MBP 含量，表明了 BC 的输入能显著促进土壤中的 TP 向 MBP 的转化，一方面可能是因为 BC 孔隙发达且比表面积巨大利于微生物的繁殖生长，微生物驱动下有机 P 和已矿化无机 P 的同化作用促进了 MBP 含量的增加（李渝等，2019）；另一方面微生物利用生物炭中的有机碳或其他有效营养物质进行生长，可以部分解释所观察到的微生物生物量的增加（Lehmann et al., 2011）。此外，不同用量 BC 虽然对土壤的 TN 没有显著影响，但 NO_3^--N 含量随 BC 输入量的增加而呈上升趋势，尤其在 20%的添加量下 NO_3^--N 含量达到显著水平，这一实验结果在 Anderson 等（2011）的实验中也得到了证实。原因可能是 BC 输入土壤后通过释放特定挥发性有机物质、吸附土壤硝化抑制剂和 N 素物质、改变土壤理化性质等影响土壤的亚硝酸氧化作用以及氨氧化作用。

基于 Hedley P 分级方法中不同的 P 组分在土壤中对微生物与植物的可利用程度以及赋

存状态存在差异，进而结合现有的分类方法，本研究将 P 组分归纳为 AP、LP、MP 和 OP 四种，其中 AP、LP 和 MP 为较易被植物吸收利用的 P，可作为有效 P 源；OP 储存在土壤矿物或团聚体内部，为植物和微生物一般难以接触和利用的 P。大量研究发现土壤 P 转化受土壤理化性质和环境条件的交互影响（刘建玲和张凤华，2000；李利霞等，2022）。本研究中，添加不同用量 BC 对 P 组分产生不同程度的影响。冗余分析发现，P 组分与土壤基本理化性质存在一定的相关关系，且 pH 是影响土壤 P 组分发生变化的最关键因素之一（图 4）。这与田沐雨等（2020）的研究结论一致，可能是 BC 的添加可以产生积极的“石灰效应”，更高的土壤 pH 可以增加微生物的生物量和活性，并最终影响土壤 P 的转化。P 有效性的提高是 BC 对土壤中 P 形态转化的主要表现形式，AP 和 LP 含量会随着 BC 添加量的增加而增加，其中 AP 在 10%和 20%浓度时与 CK 相比均达到显著水平，LP 在不同 BC 添加量下均显著提高，这表明不同用量 BC 的输入，对土壤 P 的溶解性产生影响（Gundale & Deluca, 2007），促使蓄闭态 P 转化为有效态 P（才吉卓玛等，2014）。BC 提高土壤有效态 P 的主要原因可能包括：（1）BC 中包含的可溶性 P 盐残留在输入土壤后，成为土壤可溶性 P 盐和可交换性 P 的直接来源（Gundale & Deluca, 2006）；（2）当土壤 pH 值随着 BC 的加入而增加时，土壤矿物表面负电荷的增加会导致 P 吸附的减少，且施用 BC 可能会促进活性金属氧化物组分中 P 的解吸，从而提高了土壤的 P 有效性（Hosseini et al., 2015）；（3）BC 的输入可以为土壤微生物提供能源物质（如 C 源），从而促进土壤微生物对土壤 P 的降解和固持作用，最终提高可利用态 P 的含量（黄敏等，2003）。另外，本研究发现不同用量 BC 添加后，$NaHCO_3$-P、NaOH-P 和 HCl-P 的含量均有显著增加，这与 Xu 等（2014；2016）发现的添加 BC 后对土壤 P 组分无影响且在酸性土壤中施用 BC 会略微降低 NaOH-P 的结论不同，这可能与土壤施肥状况、pH 值、不同 BC 添加量及其热解温度有关（陈斐杰等，2022）。

3.2 不同用量生物质炭对土壤酶活性及 P 转化的影响

影响土壤 P 转化的原因有很多，许多科学家已经对土壤风化程度、不同土壤类型、不同施肥与耕作方式等生物与非生物因素对土壤 P 的转化开展了大量研究（Guo & Yost, 1998；施瑶等，2014）。土壤微生物是自然界中进行能量转化和物质循环的主要贡献者，其生长代谢活动能够驱动土壤 P 周转进而改善土壤肥力（张四海等，2014），是影响 P 转化的最重要因素之一。BC 能够为参与土壤 P 转化的微生物营造合适的生存空间，它的输入可以通过改变微生物生物量、微生物群落结构和活性来影响土壤 P 转化（Warnock et al., 2007）。由微生物分泌产生的酶是土壤生态系统物质循环的关键（Zornoza et al., 2006）。本研究中，大部分与土壤 C、N 和 P 循环相关的水解酶活性在 BC 添加后均有不同程度的提高（图 2），表明 BC 的输入对土壤酶活性起到促进作用（Paz-Ferreiro et al., 2014）。原因可能是 BC 的添加可以增加土壤 Zn、Mn 和 Cu 等微量元素的含量，而这些微量元素往往与土壤酶结构和活性表达具有密切的相关性（李晓等，2014）；其次 BC 能通过静电作用以及疏水性吸引等方式使微生物在土壤中被吸附固定（Bailey et al., 2011），从而引发土壤微生物生物量和群落结构的改变，有利于提高土壤酶活性（You et al., 2014）。土壤酸性磷酸酶（ACP）活性的高低直接影响着土壤有机 P 分解转化及其生物有效性。本研究中，添加较低量（2%和 5%）的 BC 后土壤中 ACP 活性有所降低，表明输入较低量 BC 抑制土壤 P 的水解酶活性。究其原因，一方面 BC 与土壤结合增加了酶的稳定性进而阻碍了其与底物的接触；另一方面 BC 制备过程中具有的醛类和酚类等物质，都可能对其吸附的酶产生毒害作用，因此对 ACP 产生一定的负面影响（杨凯等，2021）。ln（BG）和 ln（NAG+LAP）均与 ln（ACP）呈显著正相关关系（图 3），表明 BC 的输入提高了土壤 C、N 水解酶的活性（Nasto et al., 2014），促进了 C、N 转化，为维持微生物营养元素的养分平衡，土壤微生物将分泌更多的 ACP 来获取土壤中的有效 P 从而满足自身对 P 的需求（谢欢等，2020）。土壤中 C:P 比可以作为微生物矿化土壤有机物释放 P 潜力的一种指

标（刘进等，2022），本研究中，随着不同用量 BC 的添加，土壤 C:P 比对 ACP 有显著的正效应（图 5）。原因可能是添加 BC 后，土壤 C:P 比增加，导致土壤 P 限制，并刺激土壤微生物分泌 P 水解酶，从而促进土壤 P 的转化（You et al., 2020）。N:P 比可以作为确定土壤养分限制的阈值（冯燕辉等，2020），本研究中，土壤 N:P 化学计量比对 ACP 有显著的负效应。由于 BC 中自身 N 素含量不多，且会随着培养时间的增加而以气态形式挥发（N_2O、NH_3），因此随着 BC 添加量的增加，土壤 N:P 比会有所下降，此时土壤受 N 限制严重，微生物会大量分泌 N 水解酶以维持养分平衡，由此提高 N 的有效性可以通过促进微生物的繁殖等途径对土壤 ACP 活性产生影响（刘进等，2022）。SEM 结果表明不同用量 BC 的添加对土壤理化性质产生不同程度的影响，进而提高与 C、N 循环相关的酶活性，最终促进土壤 P 的转化（ACP 活性）（王涛等，2020）。然而目前人们对 BC 自身中 P 的释放特征及其输入后在土壤中的长期缓释机制尚不清楚，仍需我们展开更加长期、系统的田间实验进行论证，为 BC 在我国南方退化人工林土壤修复中的应用与推广提供科学依据。

4 结论

在本研究中，添加 4 种不同用量的 BC 均能显著提高桉树人工林土壤的 NO_3^--N、MBP 和 pH 值；土壤 AP 和 LP 只在 10%和 20%的 BC 添加量下显著提高，而 pH、TN 和 TP 可能是改变桉树人工林土壤 P 组分的最主要因素；此外，BC 主要通过影响土壤理化性质进而提高与 C、N 循环相关的酶活性，并在一定程度上提高桉树人工林土壤的 P 转化，其中以高浓度 BC 添加量（20%）的效果最佳，而 pH、C:P 和 N:P 是驱动土壤 P 转化的最关键因子。综上，本研究表明 BC 在改善我国亚热带桉树人工林土壤 P 供应方面具有一定的应用潜力。

参考文献

ACHAT DL, BAKKER MR, AUGUSTO L, et al., 2009. Evaluation of the phosphorus status of P-deficient podzols in temperate pine stands: combining isotopic dilution and extraction methods[J]. Biogeochemistry, 92(3): 183-200.

ANDERSON CR, CONDRON LM, CLOUGH TJ, et al., 2011. Biochar induced soil microbial community change: implications for biogeochemical cycling of carbon, nitrogen and phosphorus[J]. Pedobiologia, 54(5-6): 309-320.

BAILEY VL, FANSLER SJ, SMITH JL, et al., 2011. Reconciling apparent variability in effects of biochar amendment on soil enzyme activities by assay optimization[J]. Soil Biol Biochem, 43(2): 296-301.

CAI JZM, ZHAI LM, XI B, et al., 2014. Effect of boichar on Olsen-P and $CaCl_2$-P in different types of soil[J]. Chin J Soil Sci, 45(1): 163-168. [才吉卓玛, 翟丽梅, 习斌, 等, 2014. 生物炭对不同类型土壤中 Olsen-P 和 $CaCl_2$-P 的影响[J]. 土壤通报, 45(1): 163-168.]

CAO J, YAN WD, XIANG WH, et al., 2014. Characteristics of soil phosphorus in different aged stands of Chinese fir plantations in Huitong, Hunan Province[J]. Acta Ecol Sin, 34(22): 6519-6527. [曹娟, 闫文德, 项文化, 等, 2014. 湖南会同不同年龄杉木人工林土壤磷素特征[J]. 生态学报, 34(22): 6519-6527.]

CHEN WJ, XIA HJ, LIU DF, et al., 2022. Characteristics of biochar and its effects and mechanism on soil properties[J]. J Environ Eng Technol, 12(1): 161-172. [陈斐杰, 夏会娟, 刘福德, 等, 2022. 生物质炭特性及其对土壤性质的影响与作用机制[J]. 环境工程技术学报, 12(1): 161-172.]

COSTA MG, GAMA-RODRIGUES AC, GONCALVES JLM, et al., 2016. Labile and non-labile fractions of phosphorus and its transformations in soil under *Eucalyptus* plantations, Brazil[J]. Forests, 7(1): 15.

CROUS KY, OSVALDSSON A, ELLSWORTH DS, 2015. Is phosphorus limiting in a mature *Eucalyptus* woodland? Phosphorus fertilisation stimulates stem growth[J]. Plant Soil, 391: 293-305.

DEMISIE W, LIU Z, ZHANG M, 2014. Effect of biochar on carbon fractions and enzyme activity of red soil[J]. Catena, 121: 214-221.

FENG YH, LIANG WJ, WEI X, et al., 2020. Analysis of soil nutrient characteristics of *Larix*

principis-rupprechtii forests with different altitude gradients in Guandi Mountain[J]. J West China Forest Sci, 49(4): 68-73. [冯燕辉，梁文俊，魏曦，等, 2020. 关帝山不同海拔梯度华北落叶松林土壤养分特征分析[J]. 西部林业科学, 49(4): 68-73.]

FOLTRAN EC, ROCHA JHT, BAZANI JH, et al., 2019. Phosphorus pool responses under different P inorganic fertilizers for a *Eucalyptus* plantation in a loamy Oxisol[J]. Forest Ecol Manage, 435: 170-179.

GAO LY, LIN WP, ZHANG FJ, et al., 2021. Research progress of biochar in improving soil acidification[J]. Guangdong Agric Sci, 48(1): 35-44. [郜礼阳，林威鹏，张风姬，等, 2021. 生物炭对酸性土壤改良的研究进展[J]. 广东农业科学, 48(1): 35-44.]

GAO YL, FANG F, TANG ZC, et al., 2022. Distribution characteristics of soil phosphorus forms and phosphatase activity at different altitudes in the soil of water-level-fluctuation zone in Pengxi River, Three Gorges Reservoir[J]. Chin J Envir Sci, 43(10): 4630-4638. [高艺伦，方芳，唐子超，等, 2022. 三峡库区澎溪河不同高程消落带土壤磷形态及磷酸酶活性分布特征[J]. 环境科学, 43(10): 4630-4638.

GUNDALE MJ, DELUCA TH, 2006. Temperature and source material influence ecological attributes of ponderosa pine and Douglas-fir charcoal[J]. Forest Ecol Manag, 231(1-3): 86-93.

GUNDALE MJ, DELUCA TH, 2007. Charcoal effects on soil solution chemistry and growth of Koeleria macrantha in the ponderosa pine/Douglas-fir ecosystem[J]. Biol Fert Soils, 43(3): 303-311.

GUO F, YOST RS, 1998. Partitioning soil phosphorus into three discrete pools of differing availability[J]. Soil Sci, 163(10): 822-833.

HOSSEINI BS, XU CY, XU Z, et al., 2015. Soil and foliar nutrient and nitrogen isotope composition ($\delta^{15}N$) at 5 years after poultry litter and green waste biochar amendment in a macadamia orchard[J]. Environ Sci Pollut Res, 22(5): 3803-3809.

HUANG M, WU JS, HUANG QY, et al., 2003. Process in research on microbiological action of soil phosphorus[J]. Ecol Environ ,12(3): 366-370. [黄敏，吴金水，黄巧云，等, 2003. 土壤磷素微生物作用的研究进展[J]. 生态环境, 12(3): 366-370.]

HUANG XM, LIU SY, YOU YM, 2014. Effects of N - fixing tree species on soil microbial biomass and community structure of the Second Rotation *Eucalyptus* Plantations[J]. Forest Res, 27(5): 612-620. [黄雪蔓，刘世荣，尤业明，2014. 固氮树种对第二代桉树人工林土壤微生物生物量和结构的影响[J]. 林业科学研究, 27(5): 612-620.]

JI QK, WANG D, YANG WB, et al., 2021. Effects of long-term phosphorus application on crop yield, phosphorus absorption, and soil phosphorus accumulation in maize-wheat rotation system[J]. Chin J Appl Ecol, 32(7): 2469-2476. [吉庆凯，王栋，杨文宝，等, 2021. 长期施磷对玉米-小麦轮作系统作物产量和磷素吸收及土壤磷积累的影响[J]. 应用生态学报, 32(7): 2469-2476.]

JOHAN, PRISCA D, AHMED, et al., 2021. Phosphorus transformation in soils following co-application of charcoal and wood ash[J]. Agronomy,11(10): 2010.

KLOSS S, ZEHETNER F, WIMMER B, et al., 2014. Biochar application to temperate soils: effects on soil fertility and crop growth under greenhouse conditions[J]. J Plant Nutr Soil Sci, 177(1): 3-15.

LEHMANN J, RILLIG MC, THIES J, et al., 2011. Biochar effects on soil biota—a review. Soil Biol Biochem, 43, 1812-1836.

LI F, LIANG X, NIYUNGEKO C, et al., 2019. Effects of biochar amendments on soil phosphorus transformation in agricultural soils[J]. Advan Agron, 158: 131-172.

LI X, ZHANG JW, LI LQ, et al., 2014. Effects of Biochar Amendment on Maize Growth and Soil Properties in Huang-Huai-Hai Plain[J]. Soils, 46(2): 269-274. [李晓，张吉旺，李恋卿，等, 2014. 施用生物质炭对黄淮海地区玉米生长和土壤性质的影响[J]. 土壤, 46(2): 269-274.]

LI XL, HOU XY, MU HB, et al., 2015. P fertilization effects on the accumulation, transformation and availability of soil phosphorus[J]. Acta Pratac Sin, 24(8): 218-224. [李新乐，侯向阳，穆怀彬，等, 2015. 连续 6 年施磷肥对土壤磷素积累、形态转化及有效性的影响[J]. 草业学报, 24(8): 218-224.]

LI LX, WU GZ, YU ZM, et al., 2022. Experimental study on influencing factors affecting phosphorus availability and total phosphorus leaching in farmland soil in Dagu River Basin[J]. J Soil Water Conserv, 36(2): 337-343. [李利霞，武桂芝，于宗民，等, 2022. 大沽河流域农田土壤磷有效性及全磷淋失影响因素试验[J]. 水土保持学报, 36(2): 337-343.]

LI Y, LIU YL, BAI JY, et al., 2019. Responses of soil microbial biomass C and P to different long-term fertilization treatments in the yellow paddy soil[J]. Chin J Appl Ecol, 30(4): 1327-1334.[李渝，刘彦伶，白怡婧，等, 2019. 黄壤稻田土壤微生物生物量碳磷对长期不同施肥的响应[J]. 应用生态学报, 30(4): 1327-1334.]
LIU GS, 1996. Soil physical and chemical analysis and profile description[M]. Beijing: China Agriculture Press, 24-265. [刘光菘, 1996. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京：中国农业出版社: 24-265.]
LIU J, LI J, LONG J, et al., 2022. Altitude dependence of soil ecological stoichiometry and enzyme activities in a Karst region of Southwest China[J]. J Forest Environ, 42(2): 113-122. [刘进，李娟，龙健，等, 2022. 西南喀斯特区土壤生态化学计量与酶活性的海拔特征[J]. 森林与环境学报, 42(2): 113-122.]
LIU JL, ZHANG FH, 2000.The progress of phosphorus transformation in soil and its influencing factors[J]. J Hebei Agric Univ, 23(3): 36-45. [刘建玲，张凤华，2000. 土壤磷素化学行为及影响因素研究进展[J]. 河北农业大学学报, 23(3): 36-45.]
LIU S, MENG J, JIANG L, et al., 2017. Rice husk biochar impacts soil phosphorous availability, phosphatase activities and bacterial community characteristics in three different soil types[J]. Appl Soil Ecol, 116: 12-22.
LIU YT, WEI J, LI J, 2019. Progress in hydrothermal carbonization of waste biomass and application of biochar in wastewater treatment[J]. Chem Bioeng, 36(1): 1-10. [刘亦陶，魏佳，李军, 2019. 废弃生物质水热炭化技术及其产物在废水处理中的应用进展[J]. 化学与生物工程, 36(1): 1-10.]
MURPHY J, RILEY JP, 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters[J]. Anal Chim Acta, 27: 31-36.
NASTO MK, ALVAREZ-CLARE S, LEKBERG Y, et al., 2014. Interactions among nitrogen fixation and soil phosphorus acquisition strategies in lowland tropical rain forests[J]. Ecol Lett, 17(10): 1282-1289.
NELSON DW, SOMMERS LE, 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties, 9: 539-579
OGUNTUNDE PG, ABIODUN BJ, AJAYI AE, et al., 2008. Effects of charcoal production on soil physical properties in Ghana[J]. J Plant Nutr Soil Sc, 171(4): 591-596.
PANDIT NR, MULDER J, HALE SE, et al., 2018. Biochar improves maize growth by alleviation of nutrient stress in a moderately acidic low-input Nepalese soil[J]. Sci Total Envir, 625:1380 – 1389.
PAZ-FERREIRO J, FU S, MENDEZ A, et al., 2014. Interactive effects of biochar and the earthworm Pontoscolex corethrurus on plant productivity and soil enzyme activities[J]. J Soils Sediments, 14(3): 483-494
SAIYA-CORK KR, SINSABAUGH RL, ZAK DR, 2002. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an Acer saccharum forest soil[J]. Soil Biol Biochem, 34(9): 1309-1315.
SCHNEIDER F, HADERLEIN SB, 2016. Potential effects of biochar on the availability of phosphorus-mechanistic insights[J]. Geoderma, 277: 83-90.
SCHULZ H, DUNST G, GLASER B, 2013. Positive effects of composted biochar on plant growth and soil fertility[J]. Agron Sustain Dev, 33(4): 817-827.
SHI Y, WANG ZQ, ZHANG XY, et al., 2014. Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil microbial community composition in temperate typical grassland in Inner Mongolia[J]. Acta Ecol Sin, 34(17): 4943-4949. [施瑶，王忠强，张心昱，等，2014. 氮磷添加对内蒙古温带典型草原土壤微生物群落结构的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(17): 4943-4949.]
SONG KY, MA YP, LI YX, et al., 2021. Effects of Biochar Application on Soil Phosphorus Fractions of Cunninghamia lanceolata Seedlings[J]. Soils, 53(6):1192-1199. [宋凯悦,马亚培,李宇轩，等, 2021. 生物质炭施用对杉木幼苗土壤磷组分的影响[J]. 土壤, 53(6): 1192-1199.]
TIAN D, QU ZY, LI B, et al., 2013. Influence of biochar on Sandy Soil hydraulic characteristics parameters and moisture holding properties[J]. J Irrig Drain, 32(3): 135-137. [田丹，屈忠义，李波，等, 2013. 生物炭对砂土水力特征参数及持水特性影响试验研究[J]. 灌溉排水学报, 32(3): 135-137.]
TIAN MY, YU CJ, WANG JK, et al., 2020. Effect of nitrogen additions on soil pH，phosphorus contents and phosphatase activities in grassland[J]．Chin J Appl Ecol, 31(9): 2985-2992. [田沐雨，于春甲，汪景宽，等, 2020. 氮添加对草地生态系统土壤 pH、磷含量和磷酸酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 31(9): 2985-2992.]

VALADARES SV, NEVES JCL, LEITE HG, et al., 2020. Predicting phosphorus use efficiency and allocation in eucalypt plantations[J]. Forest Ecol Manage, 460: 117859.
VANCE ED, BROOKES PC, JENKINSON DS, 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. Soil Biol Biochem, 19(6): 703-707.
WANG M, ZHOU HY, YU FY, et al., 2021. Dynamic changes of undergrowth species diversity and biomass of *Eucalyptus* robusta plantations at different ages[J]. Bull Bot Res, 41(4): 496-505. [王敏, 周润惠, 余飞燕, 等, 2021. 不同林龄桉树人工林林下物种多样性和生物量的动态变化[J]. 植物研究, 41(4): 496-505.]
WANG T, WAN XH, WANG L, et al., 2020. Effects of broadleaved tree plantation on soil phosphorus fractions and availability in different soil layers in a logged *Cunninghamia lanceolata* woodland[J]. Chin J Appl Ecol, 31(4): 1088–1096. [王涛, 万晓华, 王磊, 等, 2020. 杉木采伐迹地营造阔叶树对不同层次土壤磷组分和有效性的影响[J]. 应用生态学报, 31(4): 1088–1096.]
WARNOCK DD, LEHMANN J, KUYFER TW, et al., 2007. Mycorrhizal responses to biochar in soil–concepts and mechanisms[J]. Plant Soil, 300(1): 9-20.
WEN YG, ZHOU XG, ZHU HG, et al., 2019. Theoretical exploration and practices of ecological management in *Eucalyptus* Plantations[J]. Guangxi Sci, 26(2): 159-175. [温远光, 周晓果, 朱宏光, 等, 2019. 桉树生态营林的理论探索与实践[J]. 广西科学, 26(2): 159-175.]
WU Y, XU G, LV YC, et al., 2014. Effects of biochar amendent on soil physical and chemical properties:current status and knowledge gaps[J]. Adv Earth Sci, 29(1): 68-79. [武玉, 徐刚, 吕迎春, 等, 2014. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J]. 地球科学进展, 29(1): 68-79.]
XIE H, ZHANG QF, ZENG QX, et al., 2020. Nitrogen application drives the transformation of soil phosphorus fractions in Cunninghamia lanceolata plantation by changing microbial biomass phosphorus[J]. Chin J Ecol, 39(12): 3934-3942. [谢欢, 张秋芳, 曾泉鑫, 等, 2020. 施氮通过改变微生物生物量磷驱动杉木人工林土壤磷组分转化[J]. 生态学杂志, 39(12): 3934-3942.]
XU G, SUN JN, SHAO HB, et al., 2014. Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity[J]. Ecol Eng, 62: 54-60.
XU G, ZHANG Y, SUN J, et al., 2016. Negative interactive effects between biochar and phosphorus fertilization on phosphorus availability and plant yield in saline sodic soil[J]. Sci Total Envir, 568: 910-915.
YANG K, WANG YY, DING AZ, 2021. Stability of biochar-remediated contaminated soil from a lead mine site[J]. J Agro-Environ Sci, 40(12): 2715-2722.[杨凯, 王营营, 丁爱中, 2021. 生物炭对铅矿区污染土壤修复效果的稳定性研究[J]. 农业环境科学学报, 40(12): 2715-2722.]
YANG X, POST WM, 2011. Phosphorus transformations as a function of pedogenesis: A synthesis of soil phosphorus data using Hedley fractionation method[J]. Biogeosciences, 8(10): 2907-2916.
YOU Y, WANG J, HUANG X, et al., 2014. Relating microbial community structure to functioning in forest soil organic carbon transformation and turnover[J]. Ecol Evol, 4(5): 633-647.
YOU Y, XU H, WU X, et al., 2020. Native broadleaf tree species stimulate topsoil nutrient transformation by changing microbial community composition and physiological function, but not biomass in subtropical plantations with low P status[J]. Forest Ecol Manage, 477: 118491.
ZHANG L, WU N, WU Y, et al., 2009. Soil phosphorus form and fractionation scheme:A review[J]. Chin J Appl Ecol, 20(7): 1775-1782. [张林, 吴宁, 吴彦, 等，2009. 土壤磷素形态及其分级方法研究进展[J]. 应用生态学报, 20(7): 1775-1782.]
ZHANG SH, HUANG J, LUO RZ, et al., 2014. Effect of adding different amounts of wheat straw and phosphorus on soil microorganism community[J]. Chin J Appl Ecol, 25(3): 797-802. [张四海, 黄健, 骆争荣, 等, 2014. 添加秸秆和磷素对土壤微生物群落的影响[J]. 应用生态学报, 25(3): 797-802.]
ZHANG W, ZHANG Y, AN Y, et al., 2021. Phosphorus fractionation related to environmental risks resulting from intensive vegetable cropping and fertilization in a subtropical region[J]. Environ Pollut, 269: 116098.
ZHAO ZZ, WANG XL, LI HB, et al., 2021. Slow-release property and soil remediation mechanism of biochar-based fertilizers[J]. J Plant Nutr Fert, 27(5): 886-897. [赵泽州, 王晓

玲, 李鸿博, 等, 2021. 生物质炭基肥缓释性能及对土壤改良的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 27(5): 886-897.]
ZORNOZA R, GUERRERO C, SOLERA MJ, et al., 2006. Assessing air-drying and rewetting pre-treatment effect on some soil enzyme activities under Mediterranean conditions[J]. Soil Biol Biochem, 38(8): 2125-2134.